

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mario Staroveški

VRSTE ISPUNA UNUTRAŠNOSTI PROIZVODA
NAČINJENIH TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2015.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

VRSTE ISPUNA UNUTRAŠNOSTI PROIZVODA NAČINJENIH TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM

Mentor: prof. dr. sc. Mladen Šercer
Student: Mario Staroveški
JMBAG: 0035178795

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mario Staroveški**

Mat. br.: 0035178795

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Vrste ispuna unutrašnjosti proizvoda načinjenih taložnim očvršćivanjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Types of fillings inside the product made by fused deposition modeling**

Opis zadatka:

Taložno očvršćivanje materijala aditivni je postupak koji je originalno razvijen u tvrtci *Advanced Ceramics Research (ACR)* u Tucson, Arizona, ali ga je značajno poboljšala tvrtka *Stratasys*, Minnesota, SAD. Postupak započinje od 3D CAD modela, koji je računalnim programom podijeljen u vodoravne slojeve. Polimerni materijal u obliku žice (npr. ABS) ili vosak prolazi kroz mlaznicu, koja je upravljana s pomoću računala. Materijal napušta mlaznicu u omekšanom stanju i pri sobnoj temperaturi brzo očvršćuje, pa je zbog toga potrebno održavati temperaturu kapljevito materijala malo iznad temperature očvršćivanja.

Tvorevinama se najprije izrađuje vanjska kontura, te zatim unutrašnjost. Za proizvodnju debelostjenih tvorevina unutrašnjost stijenke može biti popunjena različitim strukturama: puna struktura, mrežasta struktura (krugovi, linije, pravokutnici, struktura pčelinjih saća (šesterokutna struktura), itd.).

U radu je potrebno na niskobudžetnom 3D printeru taložnim očvršćivanjem načiniti proizvod s različitim ispunama i odrediti optimalnu s obzirom na kompliciranost geometrije proizvoda i debljinu stijenke.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc Mladen Šercer

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPSI TABLICA	III
POPIS KRATICA I OZNAKA	IV
1 Uvod.....	1
2 Taložno očvršćivanje materijala (FDM)	2
2.1 Povijest FDM-a	2
2.2 Način rada FDM-a.....	2
2.3 Materijali za FDM	3
2.3.1 ABSplus.....	3
2.3.2 ABS-i.....	3
2.3.3 ABS-M30.....	4
2.3.4 Poliamid (PA 12).....	4
2.3.5 Polikarbonat (PC).....	5
2.3.6 Potporni materijali.....	5
2.4 Prednosti i nedostaci FDM-a	6
2.5 Primjena FDM-a.....	6
3 VRSTE ISPUNA UNUTRAŠNJOSTI PROIZVODA NAČINJENIH TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM.....	7
3.1 Ispuna pune strukture	7
3.1.1 Mehanička svojstva pune ispune.....	8
3.2 Mrežaste strukture	10
3.2.1 Pravocrtna ispuna (<i>e. Rectilinear</i>).....	10
3.2.2 Ispuna linijama	11
3.2.3 Šesterokutna ispuna	11
3.2.4 Ostale vrste ispuna	12
3.2.5 Posebne ispune.....	13
4 PRAKTIČNI DIO	14

4.1	Opis odabranog proizvoda	14
4.2	Niskobudžetni 3D pisac	15
4.3	Parametri izrade	15
4.4	Postupak izrade razdjelnika	16
4.5	Vrste ispuna	17
4.6	Rezultati ispitivanja izrađene tvorevine s različitim ispunama unutrašnjosti.....	20
4.7	Rezultat ispitivanja	21
5	Zaključak.....	24
6	LITERATURA	25
7	Prilozi	26
7.1	Tehnički nacrt razdjelnika	26

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Taložno očvršćivanje - FDM.....	2
Slika 2.2. Tvorevine načinjene od ABSplus materijala.....	3
Slika 2.3. Tvorevina izrađena od ABS-i materijala.....	4
Slika 2.4. Ventilator načinjen od ABS-M30 materijala.....	4
Slika 2.5. Tvorevina izrađena od PA 12.....	5
Slika 2.6. Tvorevina načinjena od PC	5
Slika 2.7. Potporni materijal	6
Slika 3.1. Bez ispune	7
Slika 3.2. Puna struktura s ispunom pod 90°	8
Slika 3.3. Orijentacija rasteznih ispitnih tijela u radnom prostoru.....	8
Slika 3.4. Vrsta loma kod ispitivanja tijela u X, Y i Z smjeru.....	9
Slika 3.5. Orijentacija ispitnog tijela za ispitivanje pritisnih svojstava.....	9
Slika 3.6. Vrsta loma kod ispitivanja pritisnih svojstava	9
Slika 3.7. Pravocrtna ispuna.....	10
Slika 3.8. Ispuna unutrašnjosti s linijama	11
Slika 3.9. Šesterokutna tvorevina	11
Slika 3.10. Usporedba ispuna a.) šesterokutna, b.) linijska	11
Slika 3.11. Koncentrična ispuna.....	12
Slika 3.12. Ispuna u obliku Hilbertovih krivulja.....	12
Slika 3.13. Spiralni oktagram.....	12
Slika 3.14. Ispuna u obliku Arhimedovih krivulja	12
Slika 3.15. <i>Cat infill</i>	13
Slika 3.16. <i>Sharkfill</i>	13
Slika 4.1. Primjena proizvoda	14
Slika 4.2. Primjena proizvoda, drugi kut gledanja	14
Slika 4.3. <i>Makerbot Replicator 2X</i>	15
Slika 4.4. Šesterokutna 0,25.....	17
Slika 4.5. Šesterokutna 0,5.....	17
Slika 4.6. Šesterokutna 0,75.....	17
Slika 4.7. Linearna 0,25	17
Slika 4.8. Linearna 0,5	17
Slika 4.9. Linearna 0,75	17

Slika 4.10. <i>Moroccanstar</i> 0,25	18
Slika 4.11. <i>Moroccanstar</i> 0,5	18
Slika 4.12. <i>Moroccanstar</i> 0,75	18
Slika 4.13. <i>Catfil</i> 0,25	18
Slika 4.14. <i>Catfil</i> 0,5	18
Slika 4.15. <i>Catfil</i> 0,75	18
Slika 4.16. <i>Sharkfill</i> 0,25	19
Slika 4.17. <i>Sharkfill</i> 0,5	19
Slika 4.18. <i>Sharkfill</i> 0,75	19
Slika 4.19. Oblik kruga 0,25	19
Slika 4.20. Oblik kruga 0,5	19
Slika 4.21. Oblik kruga 0,75	19
Slika 4.22. U obliku kvadrata 0,25	20
Slika 4.23. U obliku kvadrata 0,5	20
Slika 4.24. U obliku kvadrata 0,75	20
Slika 4.25. Razdjelnik: a.) prije primjene, b.) nakon primjene	20
Slika 4.26. Izdrživost proizvoda po broju ispitivanja do puknuća	22
Slika 4.27. Vremena tiskanja po gustoći ispuna	23
Slika 4.28. Promjena mase po gustoći ispuna	23

POPSI TABLICA

Tablica 4.1. Karakteristike 3D pisača.....	15
Tablica 4.2. Parametri izrade	16
Tablica 4.3. Rezultati ispitivanja.....	21

POPIS KRATICA I OZNAKA

Kratika

ABS

FDM

PA

PC

PPSF

STL

Značenje

Akrilonitril/butadien/stiren

Taložno očvršćivanje (e. *Fused Deposition Modeling*)

Poliamid

Polikarbonat

(e. *Polisuflon*)

Stereolitografija (e. *Stereolithography*)

1 Uvod

U drugoj polovici 80-ih godina prošlog stoljeća pojavljuju se aditivni postupci uz koje je povezan razvoj 3D pisača. S obzirom na sve zahtjevnije tržište, 3D pisac će radi mogućnosti svoje primjene moći ispuniti zahtjeve bez obzira na promjene na tržištu. 3D pisači nisu dostupni širem tržištu, prvenstveno zbog svoje cijene, koje se kreću od 250.000 kn pa na dalje. Međutim danas postoje niskobudžetni 3D pisači koji su zbog svoje pristupačne cijene dostupni svima koji su za njih zainteresirani, bilo da se radi o proizvodnim poduzećima i poduzećima kojima glavna djelatnost nije proizvodnja ili pojedincima koji imaju afinitet prema aditivnoj tehnologiji. S takvim pristupom tržištu povećana je prodaja 3D pisača, te svakodnevna upotreba.

Jedna od vrsta aditivnih postupaka je taložno očvršćivanje, kod kojeg se omekšani materijali slažu u slojevima. Tvrtka *Stratasys* je značajno poboljšala taj postupak i patentirala naziv *Fused deposition modeling* (FDM). Kod FDM postupka moguća je primjena više vrsta polimernih materijala s različitim svojstvima zbog čega nailaze na široku primjenu u skoro svim dijelovima industrije. Modeli načinjeni taložnim očvršćivanjem posjeduju izrazito velik udio detalja, čvrsti su i postojani pa su pogodni za testiranja te prezentaciju. Svojstva tvorevine ovise i o samoj unutarnjoj strukturi koja se razlikuje po geometriji i gustoći.

U praktičnom dijelu rada su s pomoću niskobudžetnog 3D pisača tiskani proizvodi različitih ispuna s različitim gustoćama te je na temelju dobivenih rezultata izabrana optimalna ispuna za taj proizvod.

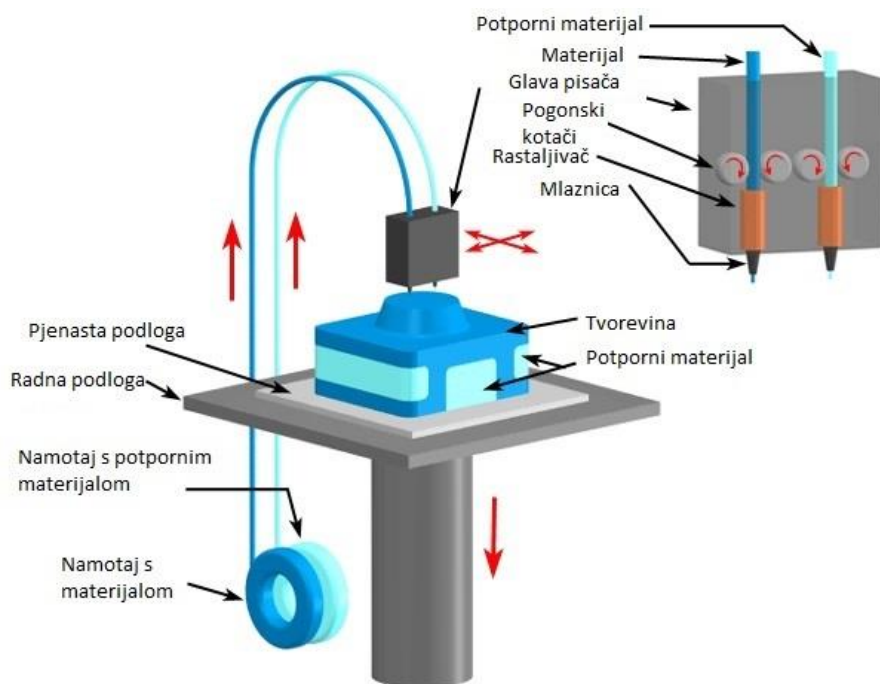
2 Taložno očvršćivanje materijala (FDM)

2.1 Povijest FDM-a

Taložno očvršćivanje materijala (e. *Fused deposition modeling* – FDM) aditivni je postupak koji je originalno razvijen u tvrtki *Advanced Ceramics Research*, ali ga je značajno poboljšala tvrtka *Stratasys*. *Stratasys* je osnovao *Crum* 1989. godine kada je patentirao postupak FDM. 1994. godine *Stratasys* postaje partner sa IBM-om, gdje rade na izradi 3D pisača. *Stratasys* je danas jedna od vodećih tvrtki u proizvodnji 3D pisača koji primjenjuju FDM postupak. [1]

2.2 Način rada FDM-a

Kod postupka FDM mogu se primjenjivati jedna ili dvije vrste materijala, ovisno o broju mlaznica na glavi pisača. Pisač sa jednom mlaznicom koristi jednu vrstu materijala, dok pisači sa dvije mlaznice koriste dvije vrste materijala: materijal za model i potporni materijal (slika 2.1). Materijal ulazi u uređaj u obliku žice koja se zagrijava u glavi i istiskuje na radnu podlogu. Glava uređaja giba se u X i Y osima, a kad je jedan sloj završen, radna podloga 3D uređaja se pomiče prema dolje po Z osi i nastavlja novi sloj. Kada je tvorevina u 3D pisaču gotova ovisno o vrsti potpornog materijala stavlja se u otopinu vode i deterdženta gdje se otapa potporni materijal i nakon toga tvorevina je spremna za upotrebu. Međutim danas u većini slučajeva, kod dostupnih uređaja na tržištu, potporna struktura se odvaja lomljenjem. [2]



Slika 2.1. Taložno očvršćivanje - FDM [3]

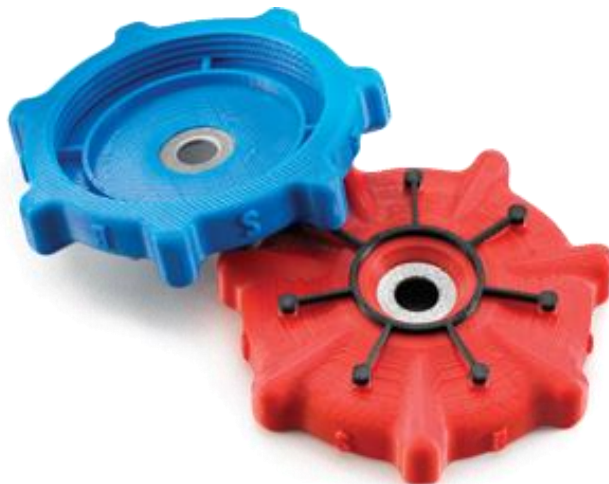
2.3 Materijali za FDM

Kod FDM postupaka mogu se primijeniti više vrsta polimernih materijala sa različitim svojstvima: akrilonitril/butadien/stiren (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PC), poli(fenilen-sulfid) (PPS) i vosak. Često se u te polimere stavljaju različiti aditivi kako bi se dobila željena svojstva pa kratice dobivaju različite nastavke npr. ABSplus, ABSi, ABS-M30. [4]

2.3.1 ABSplus

Ovaj materijal nudi najveći spektar boja (bijela, crna, tamno siva, plava, maslinasto zelena, fluorescentna, narančasta, itd.) plus opcija za posebnim bojama (slika 2.2). Dijelovi koji su tiskani ovim materijalom mehanički su jači te se njihova svojstva ne mijenjaju tijekom dužeg vremena upotrebe. ABSplus se primjenjuje s topivim potpornim materijalima zbog čega se potporni materijal jednostavno otopi u otopini čime se štedi vrijeme skidanja potporne strukture.

Također je pogodan jer se mogu tiskati složeniji oblici i strukture. [4]



Slika 2.2. Tvorevine načinjene od ABSplus materijala [4]

2.3.2 ABS-i

Primjenjuje se za izradu prozirnih dijelova, te funkcionalnih tvorevina. Ovaj materijal se može primjenjivati u automobilske industriji, zrakoplovnoj industriji i kod izrade medicinskih uređaja (slika 2.3). [4]



Slika 2.3. Tvorevina izrađena od ABS-i materijala [4]

2.3.3 ABS-M30

Ovaj materijal se ističe jakim mehaničkim svojstvima koje ga čine idealnim za izradu manjih funkcionalnih prototipova, alata, sprava i dijelova. Kompatibilan je s topivim potpornim materijalom i dolazi u sljedećim bojama: bijela, crna, tamnosiva, crvena i plava (slika 2.4). [4]



Slika 2.4. Ventilator načinjen od ABS-M30 materijala [4]

2.3.4 Poliamid (PA 12)

Svojstva tvorevina izrađena FDM-om s PA 12 imaju visoku elastičnost, kemijsku postojanost, izvrsnu žilavost, otpornost na umor i vibracije. Primjenjuje se u zrakoplovstvu, autoindustriji te

industriji široke potrošnje. Na slici 2.5 prikazana je tvorevina načinjena poliamidom. [13]



Slika 2.5. Tvorevina izrađena od PA 12 [4]

2.3.5 Polikarbonat (PC)

PC ima visoku čvrstoću i savitljivost što ga čini idealnim za zahtjevne prototipe, alate i gotove proizvode. Zbog sve većih zahtjeva na svojstva proizvoda, razvijena je mogućnost provjere dijelova uz minimalni trošak prije nego što isti krenu u serijsku proizvodnju (slika 2.6). [13]



Slika 2.6. Tvorevina načinjena od PC [4]

2.3.6 Potporni materijali

PPSF, vosak i akrilni polimeri (SR-100, -30, -20, -10) primjenjuju se kao potporni materijali kod izrade prototipa. Vosak i SR-100 se uklanjaju otapanjem, dok je PPSF tvrd, ali krhak zbog visokog stupnja tvrdoće, stoga se može lagano ručno ukloniti. Potporni materijal je prikazan na slici 2.7 ispunjen bijelom bojom. [5]



Slika 2.7. Potporni materijal [7]

2.4 Prednosti i nedostaci FDM-a

Prednosti FDM-a su manja potrošnja energije, jednostavna primjena, mogućnost izrade više prototipova, jednostavna izmjena materijala, zadovoljavajuća preciznost izrade, niska temperatura izrade, ne zahtijevaju nadzor u toku rada. Relativno je mala investicija u uređaj i niski su troškovi održavanja. [6]

Nedostaci su da je funkcionalnost tvorevina ograničena izborom materijala. Između slojeva su vidljive linije, te je u određenim slučajevima nužna primjena potporne strukture. Čvrstoća tvorevina je niža u smjeru okomitom na sami smjer izrade. Također, oscilacije temperature tijekom izrade mogu uzrokovati raslojavanje. [6]

2.5 Primjena FDM-a

FDM nudi puno mogućnosti kada je u pitanju dizajniranje jer nudi dobru točnost tvorevina, a materijal koji se primjenjuje relativno je jeftin. Tvorevine načinjene postupcima FDM su izdržljiviji i idealniji su za manje volumene konceptnih modela, inženjerskih modela, proizvodnje alata i funkcionalnih prototipova. Također vrlo dobro prikazuju oblik, a i sami su u mogućnosti izdržati rigorozna testiranja te neće doći do smanjenja veličine ili upijanja vlage. Modeli su izrađeni od ABS-a koja pruža mogućnosti bušenja, urezivanja navoja i bojanja. Postupak FDM proizvodi čvrste dijelove i prototipove s točnim detaljima stoga se njihova primjena može vidjeti u automobilske, medicinske, trgovačke, potrošačke i zrakoplovnoj industriji. [14]

3 VRSTE ISPUNA UNUTRAŠNOSTI PROIZVODA NAČINJENIH TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM

Kod izrade tvorevina načinjenih taložnim očvršćivanjem na primarnom mjestu je izrada vanjskog oblika predmeta zbog svojeg vizualnog izgleda, a na sekundarnom mjestu je vrsta ispune. Tvorevina može, a i ne mora biti ispunjena, ovisno o tome kakva je njegova funkcija. Iako nije u prvom planu po važnosti, ispuna je jednako bitna za mehanička svojstva tvorevine koja se tiska. Na način da ona pridonosi čvrstoći i postojanosti dimenzija. Osim funkcije da tvorevina ostane kruta, također pridonosi smanjenju troškova same proizvodnje i vremenu potrebnom za tiskanje, te je zbog toga potrebno odabrati optimalnu ispunu.

Razvijeno je nekoliko vrsta ispuna koje se često primjenjuju kod FDM postupka, ali premda je FDM relativno novi postupak koji se još uvijek razvija, nove vrste ispuna se razvijaju od strane profesionalnih korisnika, tvrtki te i od privatnih osoba. Ispune se dijele na dva osnovna tipa: puna struktura i mrežasta struktura (u obliku krugova, linija, pravokutnika, šesterokutna). [8]

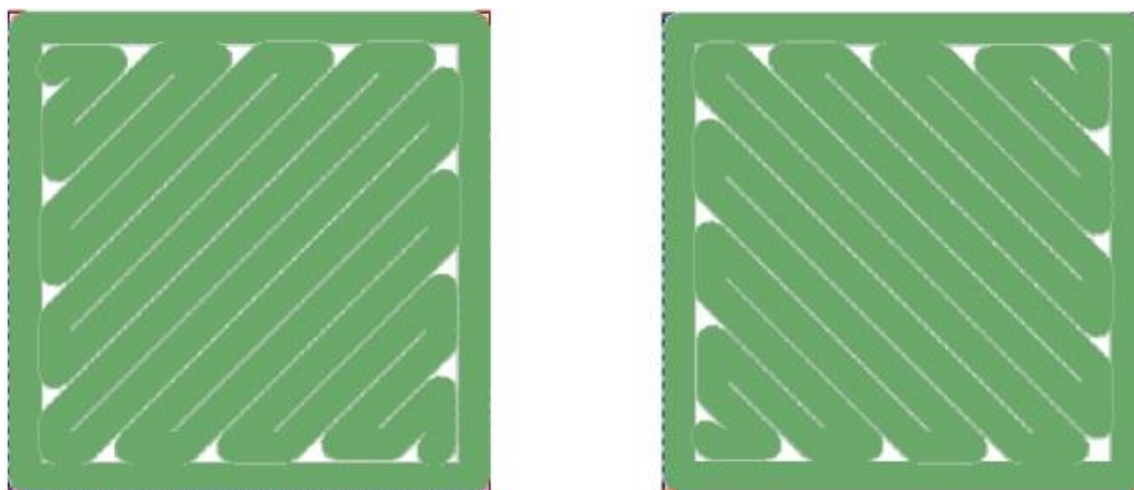
Na slici 3.1. prikazana je šuplja tvorevina, tj. bez ispune.



Slika 3.1. Bez ispune [8]

3.1 Ispuna pune strukture

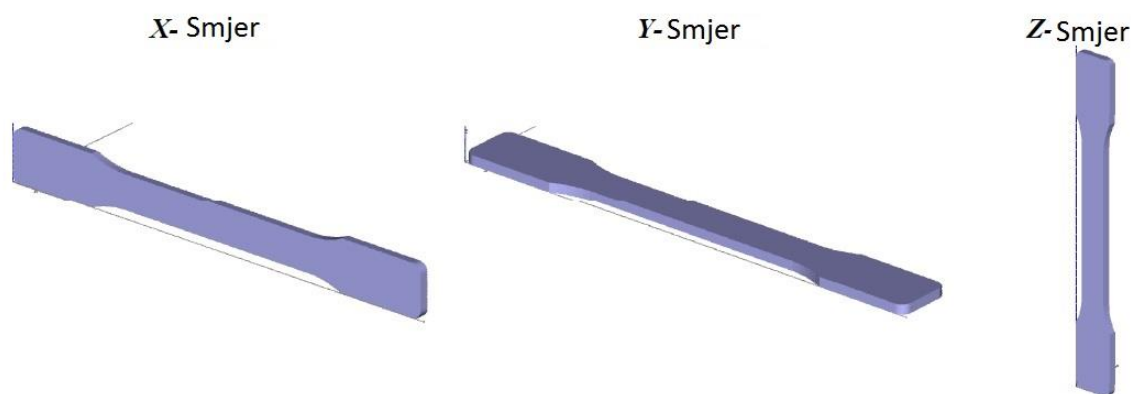
Najpopularnija puna ispuna je tzv. (e. *raster fill*) koja se sastoji od tankih rastaljenih niti orijentiranih pod kutom od 45° u odnosu na x-os u jednom sloju, dok su u sljedećem sloju zaokrenute za 90° tako da čine mrežu (slika 3.2). [9]



Slika 3.2. Puna struktura s ispunom pod 90° [9]

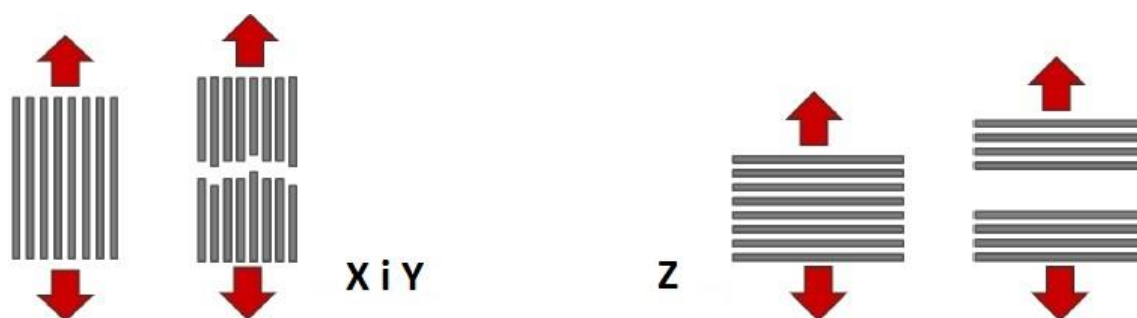
3.1.1 Mehanička svojstva pune ispune

Mehanička svojstva ispune ovise o orijentaciji tvorevine prema X , Y , i Z -osi (slika 3.3). Tvorevina koja je izrađena u smjeru X -osi ima najvišu rasteznu čvrstoću, a u smjeru Y -osi manju, dok u Z -osi ima najmanju rasteznu čvrstoću. Razlog tome je smjer opterećenja koji djeluje na ispitno tijelo. U smjeru X -osi ostvaruje se najviša rastezna čvrstoća jer je ispuna orijentirana gotovo usporedno s pravcima djelovanja sile pa sukladno tome mogu podnijeti opterećenje koje može podnijeti i sam materijal iz kojeg su izrađene. Kod vertikalnog tiskanja u smjeru osi Z rastezna čvrstoća ovisi o sljepljivanju slojeva međusobno (slika 3.3). [9]



Slika 3.3. Orijentacija rasteznih ispitnih tijela u radnom prostoru:

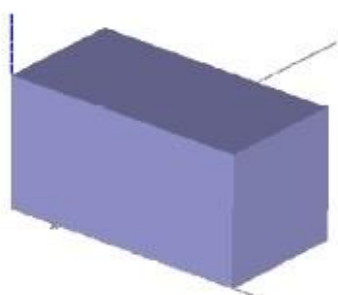
a.) X smjeru, b.) Y smjeru, c.) Z smjeru [9]



Slika 3.4. Vrsta loma kod ispitivanja tijela u X, Y i Z smjeru [9]

Pritisna čvrstoća također ovisi o orijentaciji predmeta između X, Y i Z-osi (slika 3.4). Pritisna čvrstoća bit će najveća u smjeru osi Z, a najmanja u smjeru osi XY (slika 3.5). Razlog tome je što su u slučaju XY-osi niti orijentirane usporedno sa smjerom djelovanja sile. Zbog suprotnog djelovanja sile doći će do pucanja jer sila djeluje na manjoj površini zbog lošeg lijepljenja među nitima. Pritisna čvrstoća će u smjeru osi Z biti najviša jer je sila okomita na niti pa lošije lijepljenje među nitima ne dolazi do izražaja (slika 3.6). [9]

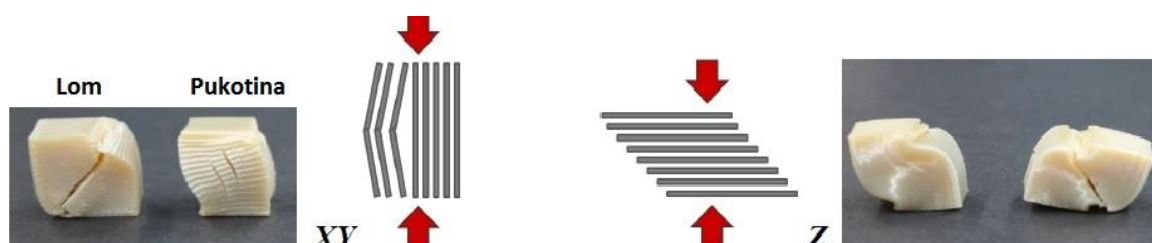
XY- Smjer



Z- Smjer



Slika 3.5. Orijentacija ispitnog tijela za ispitivanje pritisknih svojstava [9]



Slika 3.6. Vrsta loma kod ispitivanja pritisknih svojstava [9]

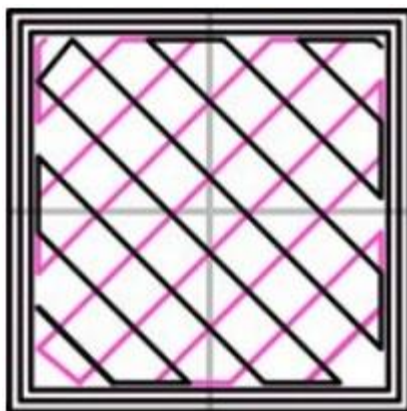
3.2 Mrežaste strukture

Mrežaste strukture se razlikuju od punih struktura po obliku ispune, ali i po samoj gustoći ispune. Gustoća ispune se mjeri na ljestvici od 0 do 1. Dok broj 1 predstavlja sto postotnu ispunu, na primjer 0,4 predstavlja četrdeset postotnu ispunu. U većini slučajeva nema potrebe da se kod modela od polimera radi ispunu od 100 %, jer bi to bilo trošenje vremena i materijala. Gustoća ispune od 40 % je kod većine modela dovoljna da se osiguraju dobra mehanička svojstva, a može biti i manja ovisno o potrebnim mehaničkim svojstvima. [10]

Različite vrste ispuna mogu se napraviti samostalnim programiranjem prema individualnim željama korisnika, samo što je za to potrebno uložiti puno vremena i znanja. 3D uređaji koji za FDM postupak često dolaze s tvornički definiranim mogućnostima tiskanja, ali postoje i različiti softveri koji omogućuju druge vrste ispuna. Najčešće se upotrebljavaju pravocrtne (e. *Rectilinear*), linije i šesterokutne (saćaste) ispune. [10]

3.2.1 Pravocrtna ispuna (e. *Rectilinear*)

To je ispuna kod koje su niti polimera pomaknute za 45° u odnosu na *X*-os u jednom sloju, a u sljedećem su sloju zaokrenute za 90° . Uzorak je isti kao kod pune ispune obrađene u poglavlju 3.1, jedino se međusobno razlikuju u samoj gustoći ispune (slika 3.7). Ova ispuna pridonosi podupiranju vanjske ljuske predmeta, dok su negativna strana ispune loša mehanička svojstva zbog porozne strukture. Podupiranje vanjske ljuske predmeta kao i naprezanja prenose se po mjestima koja se preklapaju, a ta mjesta ovise o samoj gustoći ispune. Ispuna se može primijeniti za tvorevine koji nisu namijenjeni za podnošenje većih opterećenja kao što su: slobodno stojeće figurice, tvorevine koje moraju podnijeti samo svoju težinu, mehanički dijelovi za pridržavanje, itd. [10]



Slika 3.7. Pravocrtna ispuna [10]

3.2.2 Ispuna linijama

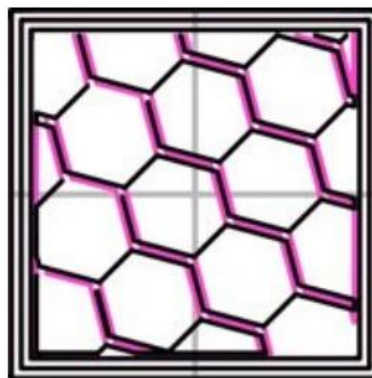
Na slici 3.8 prikazana je ispuna s linijama u naizmjeničnim smjerovima i pod drukčijim kutovima. Ima slična mehanička svojstva kao kod pravocrtne ispune čiji je glavni cilj smanjiti utrošak materijala.

3.2.3 Šesterokutna ispuna

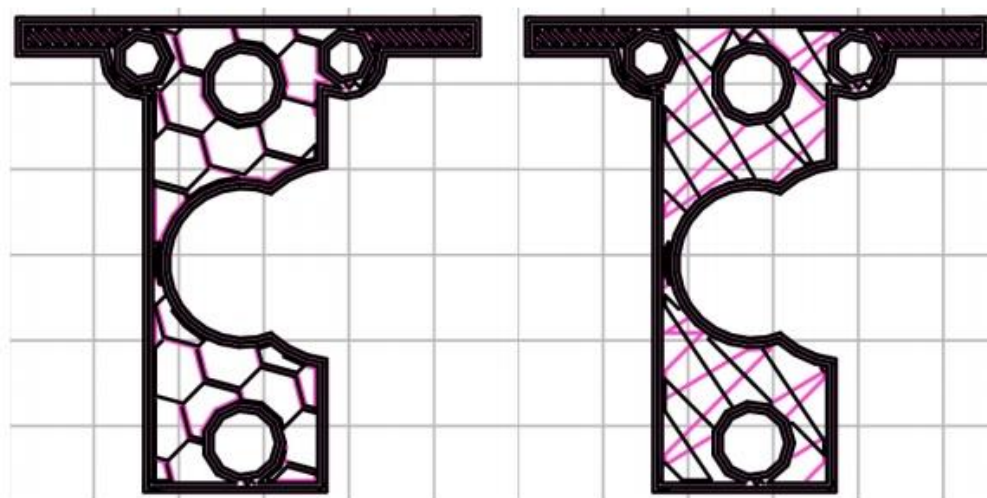
Šesterokutna ispuna ili struktura pčelinjih saća (slika 3.9) odlikuje se dobrim mehaničkim svojstvima. Zbog toga jer se svaki novi sloj podudara s prethodnim pa je površina lijepljenja veća. Sila unutar same tvorevine se ravnomjernije raspoređuje nego kod drugih ispuna zbog jedinstvenog oblika što se može vidjeti i na samoj tvorevini (slika 3.10). Šesterokutna ispuna puno bolje prati oblik tvorevine nego pravocrtna stoga je tvorevina kruća i čvršća. Nedostatak je taj što za izradu treba više vremena, a i materijala.



Slika 3.8. Ispuna unutrašnjosti s linijama [10]



Slika 3.9. Šesterokutna tvorevina [10]



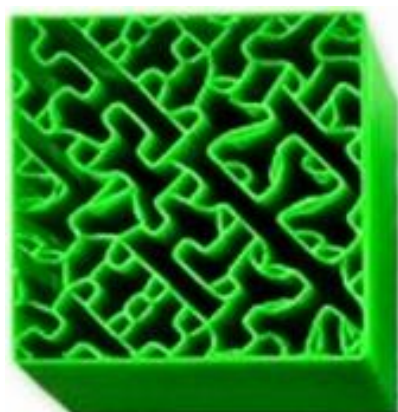
Slika 3.10. Usporedba ispuna a.) šesterokutna, b.) linijska [10]

3.2.4 Ostale vrste ispuna

Ispune koje nisu toliko popularne i koje se ne primjenjuju tako često također imaju istu funkciju kao i ostale ispune. Osim te funkcije one svojim različitim dizajnom izgledaju primamljivije u marketinškom svijetu. Tako na primjer postoje još koncentrične ispune (slika 3.11), ispuna sa Hilbert krivuljama (slika 3.12), spiralni oktagram (slika 3.13) i ispuna u obliku Arhimedovih krivulja (slika 3.14).



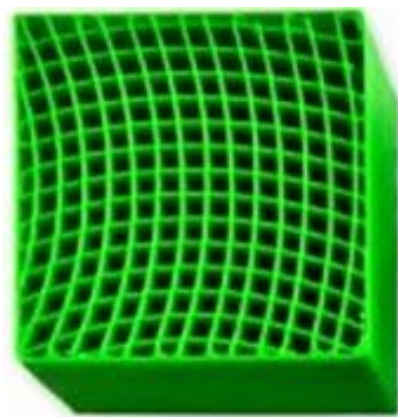
Slika 3.11. Koncentrična ispuna [8]



Slika 3.12. Ispuna u obliku Hilbertovih krivulja [8]



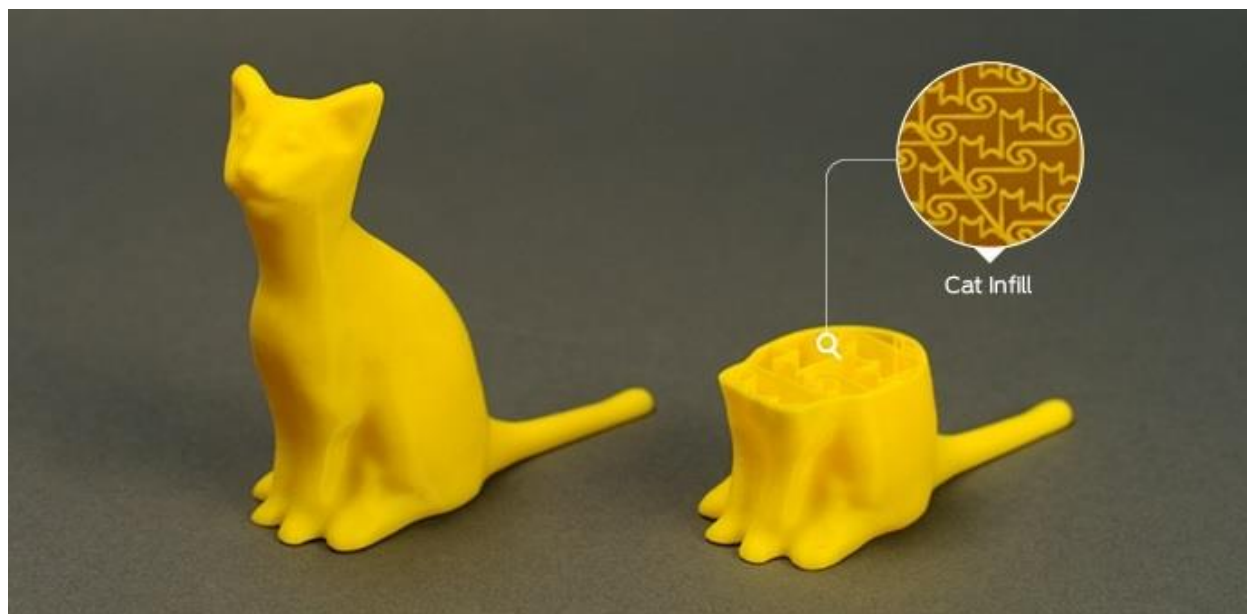
Slika 3.13. Spiralni oktagram [8]



Slika 3.14. Ispuna u obliku Arhimedovih krivulja [8]

3.2.5 Posebne ispune

Ispune osim što osiguravaju mehaničke osobine predmeta one također mogu imat i vizualnu funkciju. Na slici 3.15 tiskan je predmet u obliku mačke gdje je za ispunu upotrebljava ispuna koja također ima oblik mačke. Isto tako je i na slici 3.16 tiskan predmet u obliku morskog psa s ispunom morskog psa.



Slika 3.15. *Cat infill* [11]



Slika 3.16. *Sharkfill* [11]

4 PRAKTIČNI DIO

U sklopu rada potrebno je na niskobudžetnom 3D pisaču taložnim očvršćivanjem načiniti proizvod s različitim ispunama i odrediti optimalnu s obzirom na kompliciranost geometrije proizvoda i debljine stjenke.

4.1 Opis odabranog proizvoda

Proizvod je razdjelnik koji služi kao zaštita kod skladištenja ili transporta metalnih stolica (prilog 7.1). Proizvod izgledom podsjeća na prstenasti uskočnik koji zahvaljujući svom dizajnu i elastičnosti materijala osigurava jednostavnu montažu i funkcionalnost (slika 4.1 i slika 4.2).



Slika 4.1. Primjena proizvoda



Slika 4.2. Primjena proizvoda, drugi kut gledanja

4.2 Niskobudžetni 3D pisac

Makerbot Replicator 2X (slika 4.3) ima dvije glave za ekstrudiranje polimerne žice tj. ima mogućnost tiskanja dvije vrste materijala. Najčešće se primjenjuje jedna glava za model (tvorevinu), a druga za potporni materijal.

Maksimalna brzina tiskanja tj. pomicanja glave je 120 mm/s, ali proizvođač preporuča brzinu od 80 mm/s da se izbjegnu pogreške. Minimalna debljina sloja za tiskanje iznosi 0,1 mm, a promjer mlaznice 0,4 mm. Ostale karakteristike su navedene u tablici 4.1.



Slika 4.3. *Makerbot Replicator 2X* [12]

Tablica 4.1. Karakteristike 3D pisaca

Radni prostor	246x152x155 mm
Brzina tiskanja	80 mm/s – preporučena brzina
Debljina slojeva	0,1 mm
Promjer mlaznice	0,4 mm

4.3 Parametri izrade

Radna podloga na koju se tiska tvorevina podešen je na optimalnu temperaturu od 112 °C, jer bi u suprotnom moglo doći do odljepljivanja proizvoda sa podloge i samim time do greške u procesu. Temperatura ekstrudera iznosi 230 °C zbog materijala koji se upotrebljava za tiskanje (ABS). Ostali parametri su uzeti u skladu s dimenzijama tvorevine koji se tiska. U tablici 4.2 dani su parametri prerade za izradu razdjelnika.

Tablica 4.2. Parametri izrade

Temperatura radne podloge	112 °C
Temperatura prerade	230 °C
Brzina tiskanja	70 mm/s
Debljina gornjeg i donjeg sloja	1,2 mm
Broj ljuski	2
Debljina sloja	0,2 mm

4.4 Postupak izrade razdjelnika

Postupak izrade tvorevine je sljedeći:

- izrada CAD modela
- generiranje STL datoteke
- Provjera STL datoteke
- Učitavanje STL datoteke u programsku podršku za 3D pisač
- Pozicioniranje i podešavanja parametara za izradu
- Zagrijavanje i kalibracija samog uređaja
- Tiskanje
- Skidanje gotovog komada s radne podloge

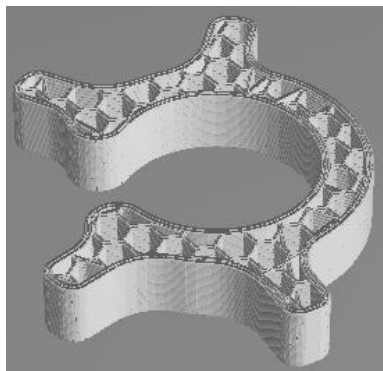
CAD model izrađen je u programu *Catia* iz kojeg je i generirana STL datoteka. STL datoteka se nakon toga učitava u programsku podršku 3D pisača *makerware* gdje se vrši pozicioniranje i podešavaju parametri za preradu. CAD model se u virtualnom prikazu pozicionira na sredinu radne podloge na način da se najveća površina modela i podloga dodiruju. Zatim se u softveru podešavaju parametri prerade, koji se vide iz tablice 4.2. U tom istom programu vrši se izbor ispuna i njihova gustoća na način da 0 nema ispune, dok 1 je sto postotna ispuna ili puni komad.

Prije tiskanja program nudi izgled gotove tvorevine gdje se još mogu vidjeti pogreške ukoliko ih ima. Također je prije tiskanja uređaj potrebno zagrijati i kalibrirati da odstupanja od originalnog CAD modela budu što manja te da se izbjegnu pogreške. Nakon svih zadovoljenih uvjeta kreće se s izradom. Vrijeme izrade ovisi o samim parametrima, geometriji i dimenzijama tvorevine. Po završetku izrade gotova tvorevina se ručno odvaja od radne podloge, nakon čega je potrebno za novo tiskanje ponoviti cijeli postupak.

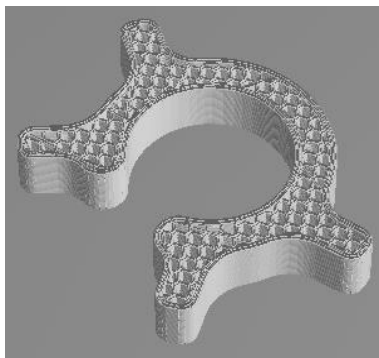
4.5 Vrste ispuna

Za zadani problem primjenjuju se ispune koje su bile zadane u programu *makerware* te su konstruirane još i dvije nove: krug i pravokutnik. *Makerware* nudi pet različitih vrsta ispuna: šesterokutna, linearna, *Moroccanstar*, *Catfill* i *Sharkfill*. U radu su izrađene različite vrste ispuna s gustoćama od 25 %, 50 % i 75 %.

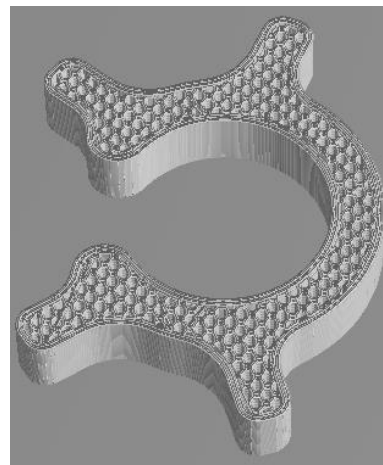
Na slikama od 4.4 do 4.24 prikazane su različite vrste ispuna s različitim gustoćama.



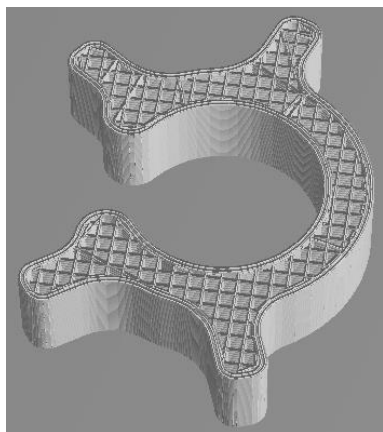
Slika 4.4. Šesterokutna 0,25



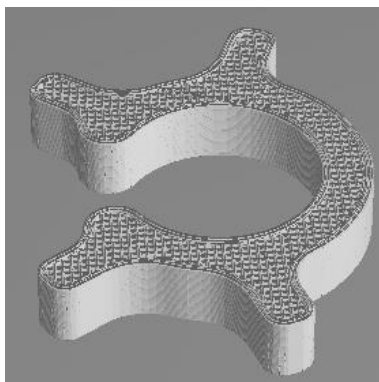
Slika 4.5. Šesterokutna 0,5



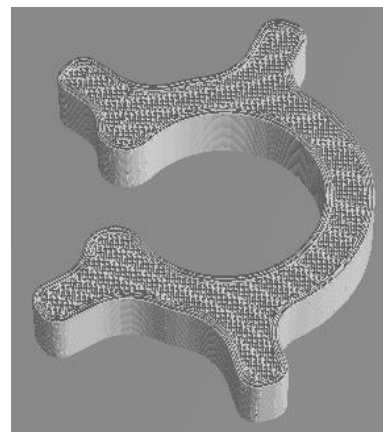
Slika 4.6. Šesterokutna 0,75



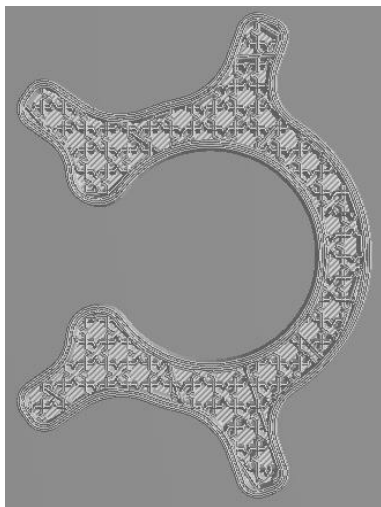
Slika 4.7. Linearna 0,25



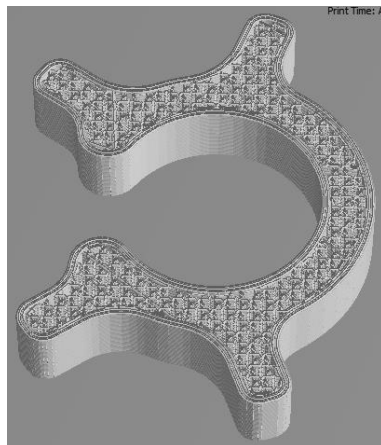
Slika 4.8. Linearna 0,5



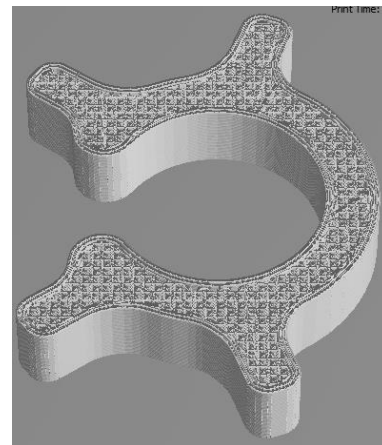
Slika 4.9. Linearna 0,75



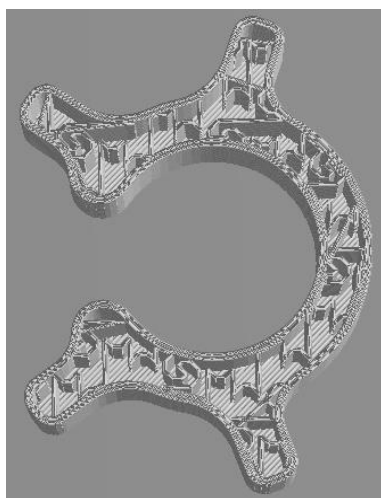
Slika 4.10. *Moroccanstar* 0,25



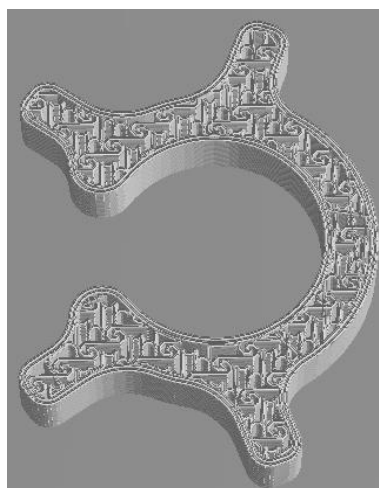
Slika 4.11. *Moroccanstar* 0,5



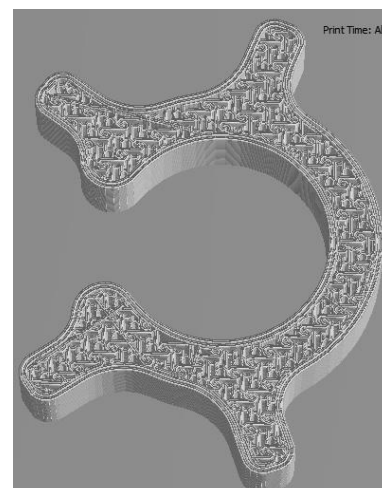
Slika 4.12. *Moroccanstar* 0,75



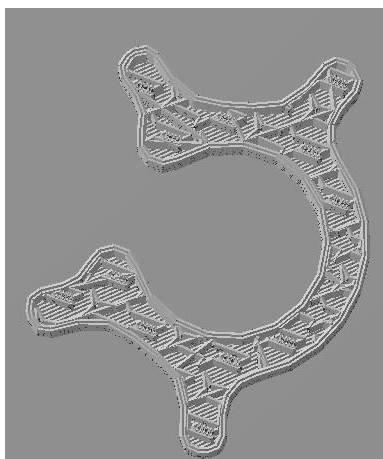
Slika 4.13. *Catfil* 0,25



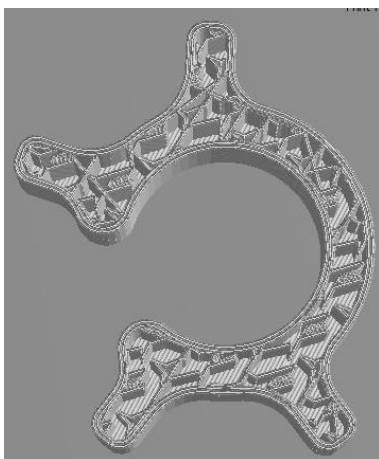
Slika 4.14. *Catfil* 0,5



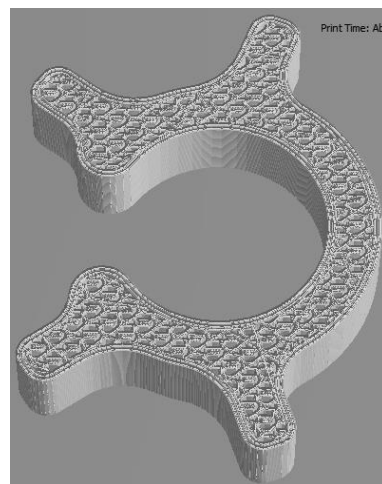
Slika 4.15. *Catfil* 0,75



Slika 4.16. *Sharkfill* 0,25



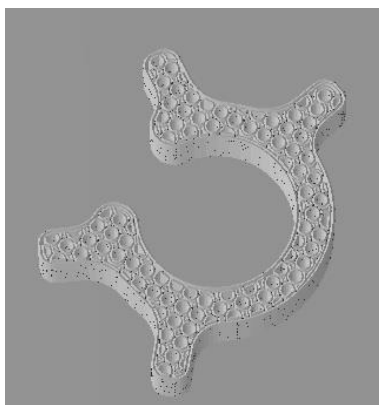
Slika 4.17. *Sharkfill* 0,5



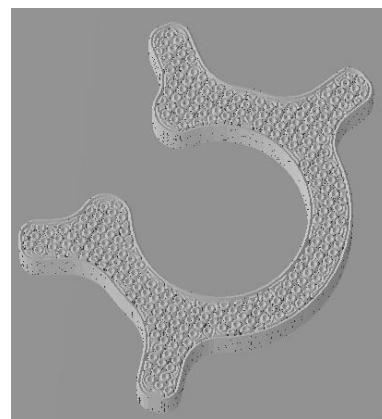
Slika 4.18. *Sharkfill* 0,75



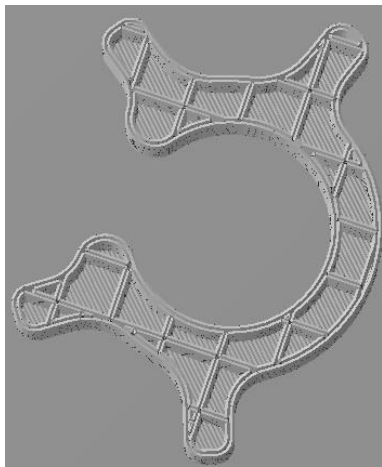
Slika 4.19. Oblik kruga 0,25



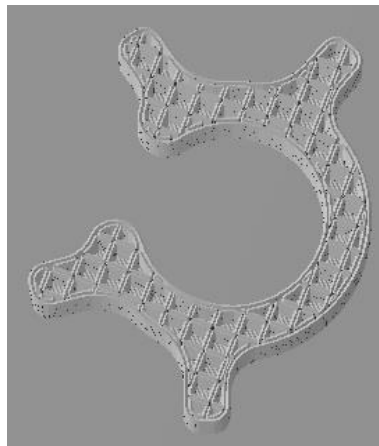
Slika 4.20. Oblik kruga 0,5



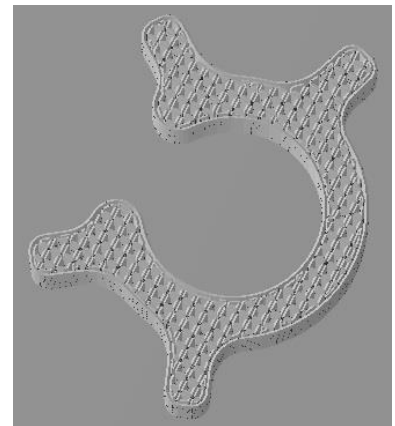
Slika 4.21. Oblik kruga 0,75



Slika 4.22. U obliku kvadrata
0,25



Slika 4.23. U obliku kvadrata
0,5



Slika 4.24. U obliku kvadrata
0,75

4.6 Rezultati ispitivanja izrađene tvorevine s različitim ispunama unutrašnjosti

Ispitivanje razdjelnika je vršeno ručno na šipki promjera 10 mm i dužoj 200mm. Postupak ispitivanja vršio se stavljanjem razdjelnika na šipku te njegovim skidanjem sa iste sve dok ponavljanje iste radnje nije dovelo do pucanja tvorevine.

Na slici 4.25 prikazan je razdjelnik prije primjene i nakon primjene. Svi razdjelnici pukli su na istom mjestu na kojem su i najviša naprezanja.



a.)



b.)

Slika 4.25. Razdjelnik: a.) prije primjene, b.) nakon primjene

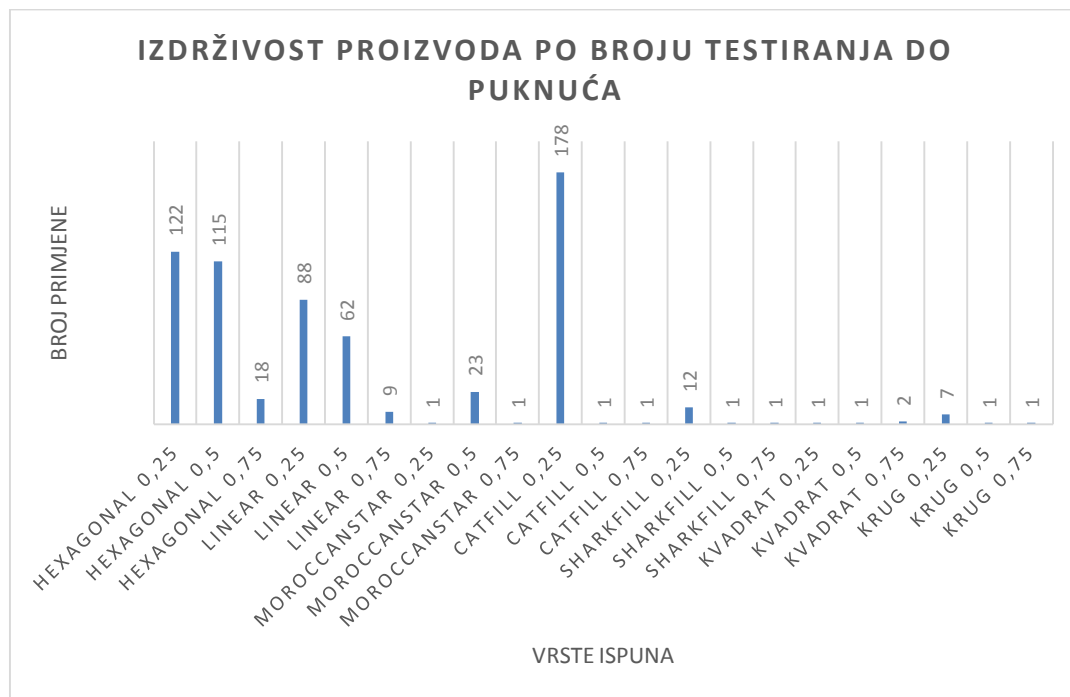
4.7 Rezultat ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Rezultati ispitivanja

Rd. broj	Vrsta ispune	Gustoća ispune	Vrijeme izrade t [min]	Masa [g]	Ispitivanje primjene do loma
1.	Šesterokutna	0,25	20	3,33	122
2.	Šesterokutna	0,5	21	3,92	115
3.	Šesterokutna	0,75	26	4,32	18
4.	Linearna	0,25	20	3,47	88
5.	Linearna	0,5	22	4,21	62
6.	Linearna	0,75	25	5,01	9
7.	<i>Moroccanstar</i>	0,25	21	3,43	1
8.	<i>Moroccanstar</i>	0,5	28	3,94	23
9.	<i>Moroccanstar</i>	0,75	35	4,27	1
10.	<i>Catfill</i>	0,25	20	3,44	178
11.	<i>Catfill</i>	0,5	26	4,45	1
12.	<i>Catfill</i>	0,75	36	5,16	1
13.	<i>Sharkfill</i>	0,25	24	3,92	12
14.	<i>Sharkfill</i>	0,5	37	5,08	1
15.	<i>Sharkfill</i>	0,75	50	5,06	1
16.	Kvadrat	0,25	31	2,8	1
17.	Kvadrat	0,5	38	3,73	1
18.	Kvadrat	0,75	48	4,58	2
19.	Krug	0,25	32	2,93	7
20.	Krug	0,5	43	3,71	1
21.	Krug	0,75	49	4,22	1

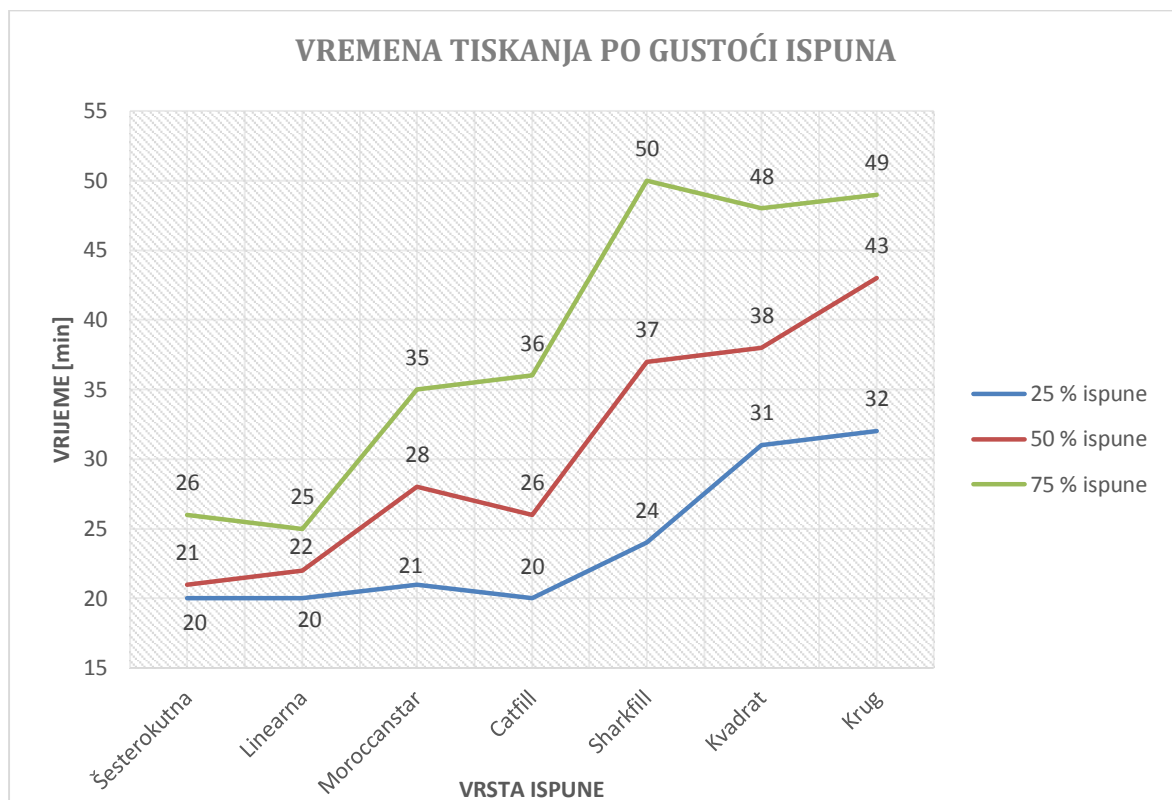
Najbolje rezultate ispitivanja postigle su tvornički definirane ispune za 3D pisač što se može iščitati iz slike 4.26. Od tvornički definiranih ispuna najizdrživija je bila *catfill* s gustoćom od 0,25. Iako ostali primjerci *catfill* ispune s gustoćom 0,5 i 0,75 nisu pokazali izdržljivost, već su nakon prvog pokušaja testiranja pukle. Šesterokutna i linearna ispuna su pokazala veću izdržljivost ukoliko se gleda na vrstu ispune, jer su izdržale veći broj ponavljanja ispitivanja kod gustoća 0,25 i 0,5. Ni kod njih se gustoća ispune od 0,75 nije pokazala izdržljivom.



Slika 4.26. Izdrživost proizvoda po broju ispitivanja do puknuća

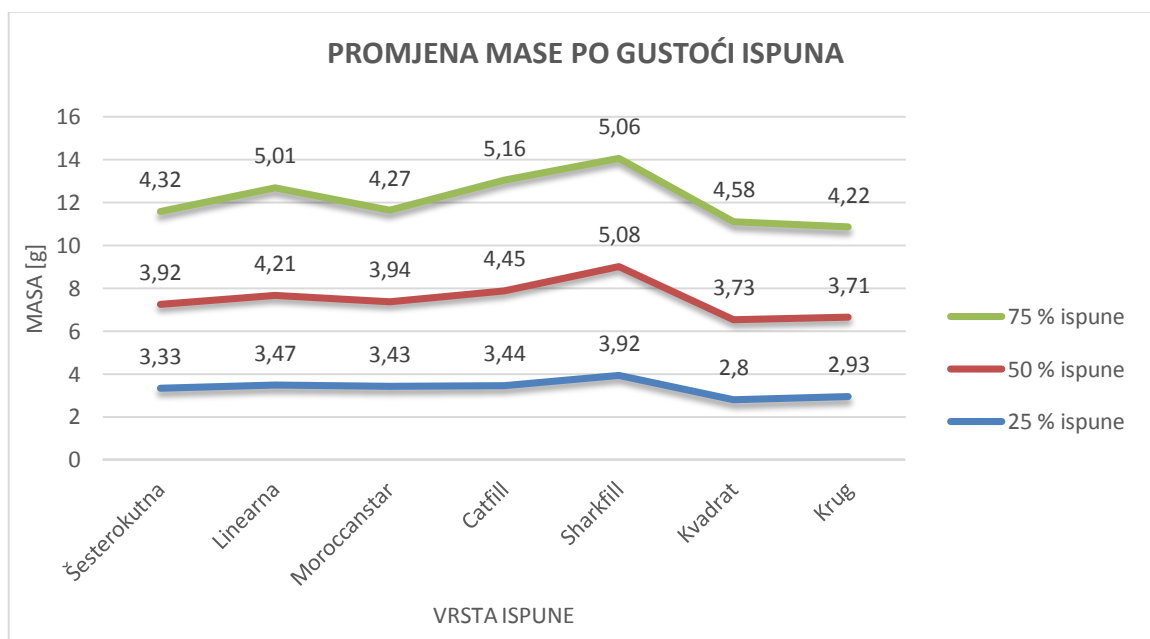
Vrijeme tiskanja je ovisno o vrsti ispune koja se primjenjuje te o njezinoj gustoći. Rezultat ispitivanja jasno pokazuje da veći postotak ispune zahtjeva dulje vrijeme izrade i da se vremena po vrsti ispuna razlikuju (slika 4.27). Vremena se također razlikuju zbog različitih geometrija ispuna gdje glava ekstrudera mora izvršiti više promjena položaja pa se troši više vremena.

Najmanju promjenu vremena za tiskanje ostvarila je ispuna od 0,25 gustoće, koja se u testu pokazala najboljom. Usporedno tome za šesterokutnu ispunu s malo lošijim rezultatima od *catfill* ispune bilo je potrebno isto vrijeme tiskanja.



Slika 4.27. Vremena tiskanja po gustoći ispuna

Na slici 4.28 prikazane su mase razdjelnika s obzirom na vrstu ispune i njihovu gustoću. Rezultatima ispitivanja ustanovljeno je da veći utrošak materijala ne znači nužno bolja mehanička svojstva. Utrošak materijala mijenja se ovisno od vrste ispune, a povećava se s povećanjem gustoće ispune. Razlog različitog utroška materijala kod jednake gustoće ispuna je zbog samog oblika ispune.



Slika 4.28. Promjena mase po gustoći ispuna

5 Zaključak

Taložno očvršćivanje materijala je postupak koji nailazi na široku primjenu u praksi zbog jednostavnosti upotrebe, pristupačnosti, niske cijene i primjene različitih vrsta materijala.

Proizvodi načinjeni taložnim očvršćivanjem posjeduju dobra mehanička svojstva, postojani su na vanjske uvjete pa se stoga mogu primijeniti za testiranja, ali i kao gotovi proizvodi. Mehanička svojstva tvorevina ovise o brojnim parametrima i čimbenicima koji moraju biti zadovoljeni da bi se tiskanje uspješno izvršilo. Današnji niskobudžetni 3D pisači dolaze s dobrom programskom podrškom koja značajno olakšava primjenu uređaja tj. zahtjeva se podešavanje samo nekoliko osnovnih parametara. Naravno ti se parametri mogu i mijenjati prema potrebama korisnika.

U ovom radu bilo je potrebno istražiti mijenjanjem vrsta ispune, koja će se ispuna pokazati optimalnom za određeni proizvod. Parametri ispune razlikovali su se po geometriji oblika i gustoći. Za svaku vrstu ispune odabrane su tri gustoće ispune; gustoća od 0,25, 0,5 i 0,75.

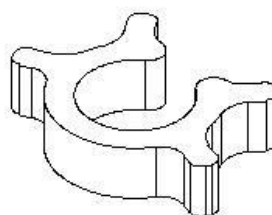
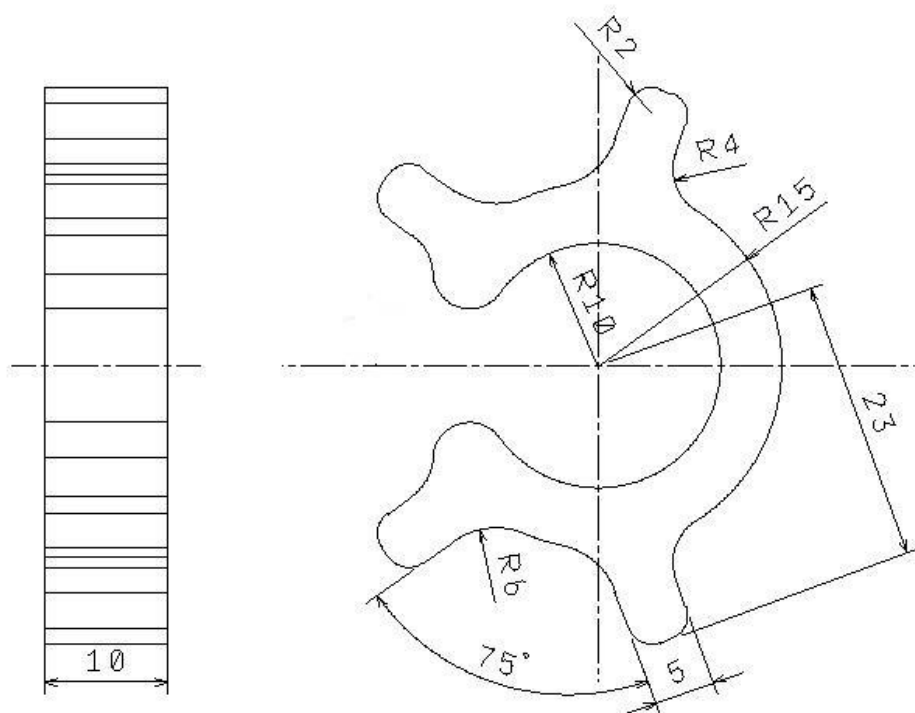
Nakon tiskanja i provedenih ispitivanja ustanovljena je optimalna vrsta i gustoće ispune za taj proizvod. Ispuna *catfill* postigla je najbolji rezultat izdržljivosti proizvoda pri gustoći 0,25. Međutim kod iste ispune se moglo primijetiti da kod ostalih gustoća nije pokazala prihvatljivu izdržljivost. Šesterokutna ispuna je zato pokazala veliku izdržljivost pri gustoćama 0,25 i 0,5. Osim dobre izdržljivosti kod ovih dviju ispuna pri gustoći od 0,25, pokazalo se da imaju isto vrijeme tiskanja te da su im mase jednake. Obje vrste ispune se mogu preporučiti za daljnju proizvodnju s obzirom na sve parametre, no ipak *catfill* ispuna pri gustoći od 0,25 je trajnija.

6 LITERATURA

- [1] <https://www.whiteclouds.com/3dpedia.index/fused/deposition-modeling-fdm>, 23.8.2014.
- [2] <http://studiofathom.com/knowledge-center/technology/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-technology/>, 23.8.2014.
- [3] <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>, 23.8.2014.
- [4] <http://studiofathom.com/knowledge-center/materials/>, 27.8.2014.
- [5] <http://www.livescience.com/39810-fused-deposition-modeling.html>, 28.8.2014.
- [6] <http://3d-print.blogspot.com/2008/02/fused-deposition-modelling.html>, 23.8.2014.
- [7] <http://replicatorinc.com/blog/2010/08/guest-post-are-two-heads-better-than-one/>, 28.8.2014.
- [8] <http://support.solidoodle.com/hc/en-us/articles/201295134-Infill>, 29.8.2014.
- [9] [http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/Mechanical %20 Properties%20of%20Ultem%20FDM%20Parts.pdf](http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/FDM%20Test%20Reports/Mechanical%20Properties%20of%20Ultem%20FDM%20Parts.pdf), MECHANICAL PROPERTIES OF FUSED DEPOSITION MODELING PARTS MANUFACTURED WITH ULTEM*9085, ANTEC 2011, Boston, 9.2.2015.
- [10] <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>, 10.2.2015.
- [11] <http://www.makerbot.com/blog/category/makerware/>, 10.2.2015.
- [12] <http://www.makerbot.com/>, 18.2.2015.
- [13] <http://www.stratasys.com/materials>, 22.2.2015.
- [14]] <http://www.incodema3d.com/fdm/fdm-applications>, 30.8.2014.

7 Prilozi

7.1 Tehnički nacrt razdjelnika



Mjerilo 1:1

Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Razradio		Mario Staroveški		
Crtao		Mario Staroveški		
Pregledao		Ana Pilipović		
Objekt: Razdjelnik			Objekt broj: 1	
			R. N. broj: 1	
Napomena:				
Materijal: ABS		Masa: 6 g		
	Naziv: Razdjelnik		Pozicija:	Kopija
			1	
Mjerilo originala	Crtež broj: 1			Format: A4
2:1				Listova: 1
				List: 1